

**PENGOPTIMUMAN JARAK LALUAN MATA ALAT MENGGUNAKAN
ALGORITMA KOLONI SEMUT UNTUK PROSES
PENGISARAN POKET**

HASLINA BINTI ABDULLAH

**TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMENUHI SEBAHAGIAN
DARIPADA SYARAT MEMPEROLEHI IJAZAH
DOKTOR FALSAFAH**

**FAKULTI KEJURUTERAAN DAN ALAM BINA
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI**

2017

PENGAKUAN

Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan sumbernya.

10 April 2017

HASLINA BINTI ABDULLAH
P68069



PTTA UTHM
PERPUSTAKAAN TUNKU TUN AMINAH

PENGHARGAAN

Syukur Alhamdulillah kepada Allah S.W.T kerana memberikan saya kesihatan yang cukup, masa dan kematangan fikiran untuk menyiapkan kajian ini dalam bentuk sebegini rupa. Jutaan terima kasih kepada penyelia utama Prof. Madya Ir Dr. Rizauddin Ramli di atas bantuan yang begitu besar, bimbingan, teguran dan nasihat yang begitu berguna sepanjang kajian ini. Tidak lupa juga penyelia kedua saya iaitu Prof Dr. Dzuraidah Abd Wahab yang banyak membantu dari segi penulisan tesis dan memberikan motivasi dan semangat di dalam menyiapkan kajian ini.

Penghargaan seterusnya kepada Skim Geran Penyelidikan Fundamental (FRGS) kod FRGS/2/2014/TK01/UKM/02/1 dan Kementerian Pendidikan Tinggi di atas geran yang diberikan. Terima kasih juga saya ucapkan kepada pihak Universiti Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM) dan Kementerian Pendidikan Tinggi di atas biasiswa yang diberi bagi melancarkan lagi proses pengajian saya. Proses uji kaji bagi kajian ini dijalankan di German Malaysian Institute (GMI). Penulis ingin mengucapkan ribuan terima kasih kepada pegawai GMI, Encik Abdul Rahman dan juruteknik, En Zul yang banyak membantu saya dalam menyiapkan uji kaji dan mendapatkan data yang betul.

Selain itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada rakan seperjuangan yang berusaha bersama-sama dalam melakukan penyelidikan sama ada yang berada di Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) atau di Universiti Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM). Kata-kata semangat dan dorongan serta nasihat yang diberi menambahkan lagi semangat penulis di dalam menyiapkan kajian ini.

Akhir sekali, terima kasih buat ibu, Ramlah Abdul Rahman di atas doa dan dorongan yang tidak pernah berbelah bagi. Tidak lupa juga buat keluarga mentua di atas segala bantuan dan dorongan. Tidak dilupakan, buat Mohamad Shukri Zakaria dan anak-anak tercinta, Faris Hakimi, Firas Hakimi dan Faiq Putra Ilhami. Terima kasih kerana sentiasa bersama sepanjang tempoh pengajian ini. Sesungguhnya, pengorbanan anak-anak yang menguatkan semangat penulis dalam menyiapkan kajian tesis ini. Tanpa dorongan, pemahaman dan sokongan yang sepenuhnya, adalah mustahil bagi penulis menyiapkan kajian ini.

ABSTRAK

Pada masa kini, proses pemesinan kisar poket menggunakan mesin Kawalan Komputer Berangka (CNC) banyak digunakan dalam pemotongan logam. Terdapat dua langkah pemesinan di dalam proses pengisaran poket iaitu pemesinan kasar dan kemas. Pemesinan kasar mengambil masa lebih 50 % dari keseluruhan masa pemotongan kerana sejumlah besar bahan kerja dipotong sehingga hampir menyerupai bentuk yang dikehendaki. Oleh itu, adalah penting untuk mempercepatkan masa pemesinan kasar. Pemesinan kontur selari dapat menghasilkan masa pemesinan kasar yang lebih rendah berbanding zigzag dan satu hala. Walau bagaimanapun, terdapat satu masalah di dalam pemesinan kontur iaitu berlaku bahagian lebihan tidak terpotong pada bahagian bucu dan tengah. Kawasan lebihan tidak terpotong ini berlaku kerana penetapan nilai selang antara kontur (ω) yang melebihi jejari mata alat (r). Salah satu cara untuk memotong kawasan lebihan ini adalah dengan menambahkan satu laluan mata alat tambahan (L_{lt}) ke atas laluan asal, iaitu laluan kontur selari. Kaedah penghasilan laluan mata alat tambahan yang diperkenalkan kajian terdahulu berjaya untuk memotong keseluruhan kawasan lebihan ini. Namun, laluan yang dihasilkan oleh kajian sebelum ini tidak mempertimbangkan pergerakan mata alat yang menyumbang kepada peningkatan jarak laluan mata alat dan masa pemesinan kasar. Oleh itu, objektif kajian ini adalah untuk mengoptimumkan laluan mata alat bagi menentukan jarak laluan mata alat yang minimum di dalam proses pengisaran poket berdasarkan pemesinan kontur selari menggunakan kaedah cerdas buatan (AI). Algoritma kontur selari (Algo-KS) dibina bagi menghasilkan laluan mata alat secara kontur selari dan untuk menentukan kawasan lebihan tidak dipotong. Algoritma Koloni Semut berdasarkan aturan peralihan baru (ACO-PB) telah diperkenalkan untuk menentukan pergerakan mata alat bagi memotong kawasan lebihan berdasarkan aturan peralihan dan jarak minimum di antara dua kawasan lebihan. ACO-PB telah diuji keberkesannya ke atas dua model iaitu model pertama dan model kedua bagi menentukan masa pemesinan kasar (T_{mk}). Seterusnya, T_{mk} yang diperoleh ini disahkan keputusannya menggunakan proses uji kaji pemesinan. Uji kaji dilakukan dengan mempraktikkan laluan mata alat yang dihasilkan berdasarkan ACO-PB ke dalam mesin kisar CNC tiga-paksi. Bahan kerja Aluminium 6061 dan mata alat jenis keluli laju tinggi (HSS) hujung rata yang bersalut Titanium Nitrida digunakan sepanjang proses pemesinan kasar. Hasil kajian mendapati terdapat perbezaan T_{mk} sebanyak 7.2 % di antara T_{mk} ACO-PB dan uji kaji. Keputusan ini telah mengesahkan bahawa ACO-PB yang dibangunkan berupaya untuk meminimumkan jarak laluan mata alat dan dapat dipraktikkan di dalam proses pemesinan sebenar. L_{lt} dan T_{mk} yang dihasilkan ACO-PB juga telah dibandingkan dengan L_{lt} dan T_{mk} yang diperoleh berdasarkan kajian terdahulu. Keputusan simulasi menunjukkan ACO-PB telah menghasilkan laluan mata alat yang lebih pendek sebanyak 23.7 % dan pengurangan T_{mk} sebanyak 4.95 % berbanding kajian terdahulu. Kajian ini juga telah membandingkan T_{mk} yang diperoleh menggunakan ACO-PB dan Mastercam dan mendapati ACO-PB berjaya mengurangkan T_{mk} sebanyak 46.5 %. Sebagai kesimpulan, kajian ini telah berjaya membangunkan algoritma ACO-PB yang berupaya untuk meminimumkan jarak laluan mata alat di dalam pemesinan kontur selari dan mengurangkan masa pemotongan bagi proses pemesinan kasar.

TOOL PATH LENGTH OPTIMIZATION USING ANT COLONY ALGORITHM FOR POCKET MILLING PROCESS

ABSTRACT

Nowadays, the machining processes of pocket milling using Computer Numerical Control machine (CNC) widely used in the metal-cutting process. There are two steps for the process of pocket milling, which is roughing and finishing. The roughing process consumes more than 50 % of the total cutting time due to the removal of a large amount of material to produce the part geometry close to the desired shape. Therefore, it is important to shorten the roughing time. The contour parallel machining has produced lower roughing time compared to the zigzag and one-way machining. However, there is a problem with the contour parallel machining in which an uncut region will exist at the corner and centre. The uncut region is due to the defined tool path interval (ω) which is larger than the radius of cutting tool. One way to remove the uncut region is by adding an extra tool path (L_{lt}) on the original tool path which is contour parallel. The method introduced by previous study was succeeding to remove the entire uncut regions. However, the tool path proposed by the previous studies does not consider the movement of cutting tool, which causes to increasing of tool path length and roughing time. Therefore, the objective of this study is to optimize the tool path to determine the optimal tool path length of pocket milling based on the contour parallel machining using Artificial Intelligence method (AI). Algorithm of contour parallel (Algo-KS) has been developed to produce the contour parallel tool path and determining the uncut region. Ant Colony Optimization (ACO) based on new transition rules (ACO-PB) has been introduced to determine the movement of the tool based on probability rules and the minimum distance between two uncut regions. The effectiveness of ACO-PB has been tested on two models which is the first model and second model to determine the roughing time (T_{mk}). Then, an experiment has been carried out to validate the T_{mk} . Milling machine CNC 3-axes has been used to apply the tool path generated by ACO-PB. Aluminium 6061 material and coated Titanium Nitride High Speed Steel (HSS) cutting tool flat end mill has been used during the roughing process. The study found that there is a difference of 7.2 % of roughing time between T_{mk} ACO-PB and experiment. This result has confirmed that ACO-PB could minimize the tool path length and can be practiced in the real machining process. The results of L_{lt} and T_{mk} were also comparing to the previous study. The simulation results show that ACO-PB generated the tool paths shorter by 23.7 % and cutting time reduction of 4.95 % compared to the previous study. This study also compared the T_{mk} between ACO-PB and Mastercam and found that ACO-PB successfully reduced the T_{mk} by 46.5 %. As a conclusion, this research has succeeded in developing an algorithm of ACO-PB which is capable to minimising the tool path length in contour parallel machining and reducing the cutting time in roughing process.

KANDUNGAN

	Halaman
PENGAKUAN	ii
PENGHARGAAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KANDUNGAN	vi
SENARAI JADUAL	xi
SENARAI ILUSTRASI	xii
SENARAI SIMBOL	xix
SENARAI SINGKATAN	xx
SENARAI ISTILAH	xxi
 BAB I PENGENALAN	
1.1 Pengenalan	1
1.2 Permasalahan Kajian	4
1.3 Persoalan Kajian	6
1.4 Objektif Kajian	6
1.5 Skop Kajian	7
1.6 Struktur Tesis	8
 BAB II KAJIAN KEPUSTAKAAN	
2.1 Pengenalan	9
2.2 Pengoptimuman Proses Pemesinan	10
2.2.1 Kaedah Pengoptimuman Bukan Konvensional	11
2.2.2 Aplikasi Kaedah Cerdik Buatan di dalam Proses Pemesinan	13
2.2.3 Ringkasan Kaedah Pengoptimuman di dalam Proses Pemesinan	17
2.3 Proses Pemesinan Pengisaran Poket	24
2.3.1 Pengoptimuman Masa Pemotongan	25
2.3.2 Pengoptimuman Jarak Laluan Mata Alat	27

2.3.3	Teknik Pemesinan bagi Proses Pengisaran Poket	33
2.4	Algoritma Ofset Kontur Selari	37
2.4.1	Pengesanan Gangguan Pasangan demi pasangan (PWID)	38
2.4.2	Gambar rajah Voronoi	39
2.4.3	Teknik Pembahagi Sudut	41
2.5	Penghasilan Laluan Mata alat Tambahan	47
2.5.1	Kaedah Penyambungan Lengkuk Pusat Kontur Selari	55
2.6	Pengoptimuman Koloni Semut	60
2.6.1	Pembinaan Penyelesaian dan Pengemaskinian Feromon	63
2.6.2	Kesan Parameter ACO	64
2.7	Aplikasi Permasalahan Pengembaraan Jurujual bagi Proses Pemesinan	68
2.8	Ringkasan Kajian Kepustakaan	70
BAB III	METODOLOGI	
3.1	Pengenalan	74
3.2	Penentuan Bentuk Bahan Kerja	77
3.3	Penghasilan Laluan Mata Alat di dalam Pengisaran Poket	79
3.3.1	Pembangunan Algoritma Ofset Kontur Selari	80
3.3.2	Pengesanan Kawasan Lebihan yang tidak dipotong	87
3.4	Pengoptimuman Jarak Laluan Mata alat	91

3.4.1	Pengoptimuman Koloni Semut	92
3.4.2	Pengoptimuman Koloni Semut Terubah Suai	97
3.4.3	Penentuan Parameter Pengoptimuman Koloni Semut	102
3.4.4	Penentuan Masa Pemesinan Kasar	104
3.5	Pengesahan Masa Pemesinan Kasar	106
3.5.1	Penghasilan G-kod bagi Pengisaran Poket	109
3.5.2	Proses Pemesinan Menggunakan Mesin Kisar	112
3.6	Pengujian Keberkesanan Algoritma Pengoptimuman ACO-PB	116
BAB IV	KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN	
4.1	Pengenalan	119
4.2	Pelaksanaan Algoritma Ofset dan Penentuan Koordinat kawasan lebihan	119
4.3	Penetapan Parameter bagi ACO	126
4.4	Penetapan Parameter bagi ACO-PB	129
4.5	Pengoptimuman Jarak Laluan Mata Alat Tambahan	132
4.6	Pengesahan Masa Pemesinan Kasar	135
4.7	Perbandingan Masa Pemesinan Kasar Antara ACO-PB dengan Kajian Terdahulu	137
4.7.1	Perbandingan Masa Pemesinan Kasar antara ACO- PB dan kajian terdahulu berdasarkan Uji Kaji	139
4.8	Perbandingan Masa Pemesinan Kasar ACO-PB dan ACO biasa	141
4.9	Kesan Peningkatan Nilai Selang antara Kontur	144

4.9.1	Perbandingan Masa Pemesinan Kasar bagi Nilai Selang Berbeza antara ACO-PB dan Uji kaji	149
4.9.2	Perbandingan Masa Pemesinan Kasar bagi Nilai Selang Berbeza antara ACO-PB dan ACO	152
4.10	Perbandingan Masa Pemotongan di antara ACO-PB dan Kaedah Konvensional	154
4.11	Pengoptimuman Jarak Laluan Mata Alat bagi Model Kompleks	156
4.10.1	Perbandingan Masa Pemesinan Kasar antara ACO- PB dan Uji kaji	160
4.12	Ringkasan Keseluruhan	162
BAB V	KESIMPULAN DAN CADANGAN	
5.1	Pengenalan	164
5.1.1	Kesimpulan	164
5.2	Cadangan Untuk Kajian Lanjutan	166
5.3	Sumbangan Kajian	166
	RUJUKAN	168
	LAMPIRAN	181
	LAMPIRAN A	182
	LAMPIRAN B	184
	LAMPIRAN C1	188
	LAMPIRAN C2	189
	LAMPIRAN C3	190
	LAMPIRAN C4	191

LAMPIRAN D1	192
LAMPIRAN D2	194
LAMPIRAN E	196



SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
Jadual 2.1	Ringkasan aplikasi kaedah cerdik buatan di dalam proses pemesinan	19
Jadual 2.2	Kombinasi α dan β bagi 30 bandar	66
Jadual 2.3	Kombinasi α dan β bagi 51 bandar	67
Jadual 2.4	Kombinasi α dan β bagi 100 bandar	67
Jadual 3.1	Kombinasi parameter bagi α dan β	103
Jadual 3.2	Parameter pemesinan bagi uji kaji	115
Jadual 4.1	Jarak laluan mata alat bagi setiap kombinasi α dan β bagi model pertama	127
Jadual 4.2	Jarak laluan mata alat bagi setiap kombinasi α dan β bagi model kedua	129
Jadual 4.3	Jarak laluan mata alat bagi setiap kombinasi α dan β bagi model pertama	130
Jadual 4.4	Jarak laluan mata alat bagi setiap kombinasi α dan β bagi model kedua	131
Jadual 4.5	Ringkasan nilai parameter bagi ACO dan ACO-PB	132
Jadual 4.6	Jarak laluan mata alat dan masa pemesinan kasar	139
Jadual 4.7	Masa pemesinan kasar antara simulasi dan uji kaji	141
Jadual 4.8	Jarak laluan mata alat dan masa pemesinan kasar	149
Jadual 4.9	Ringkasan jarak laluan mata alat dan masa pemesinan kasar	160

SENARAI ILUSTRASI

No. Rajah		Halaman
Rajah 2.1	Klasifikasi kaedah pengoptimuman	10
Rajah 2.2	Aplikasi kaedah AI di dalam proses pemesinan	18
Rajah 2.3	Proses pemesinan di dalam pengisaran poket (a) Pemesinan kasar (b) Kemasan	24
Rajah 2.4	Pengoptimuman laluan mata alat bagi (a) kontur selari (b) koordinat kontur	29
Rajah 2.5	Pembahagian kawasan berdasarkan kontur	30
Rajah 2.6	Penentuan titik sempadan (*) pada setiap bentuk di dalam pemesinan poket	30
Rajah 2.7	Penyambungan kontur selari (a) Penentuan gegelung (b) Sambungan gegelung	31
Rajah 2.8	Teknik pemesinan asas (a) zig-zag (b) kontur selari	33
Rajah 2.9	Laluan mata alat di dalam sistem CAM (a) zig-zag (b) zig-zag rata (c) kontur selari (d) pilin rata (e) ekor ikan rata	34
Rajah 2.10	Jenis laluan mata alat di dalam Mastercam (a) Zig-zag (b) Kontur selari (c) Kontur selari bucu bersih (d) Satu hala (e) Pilin bertindih berterusan (f) Pilin rata (g) Kelajuan tinggi (h) Pilin benar	35
Rajah 2.11	Elemen geometri asas dalam pendekatan PWID	38
Rajah 2.12	Gambar rajah Voronoi	39
Rajah 2.13	Kontur ofset yang lengkap	40
Rajah 2.14	Gambar rajah Voronoi (a) Pembinaan kitaran yang tepat (b) Pembinaan kitaran yang tidak tepat	41

Rajah 2.15	Sudut cembung dan sudut cekung bagi sesuatu poligon	42
Rajah 2.16	Pengiraan titik ofset bagi sudut berlainan (a) cekung (b) cembung (c) selari	43
Rajah 2.17	Pemboleh ubah bagi profil sempadan	44
Rajah 2.18	Penghasilan garisan ofset yang tidak sah	45
Rajah 2.19	Pengesahan penghasilan titik ofset (a) arah yang sah (b) arah yang tidak sah	45
Rajah 2.20	Perbezaan antara ofset sisi dan ofset bucu	46
Rajah 2.21	Jenis kawasan lebihan tidak dipotong di dalam kontur selari (a) bucu (b) tengah (c) leher	47
Rajah 2.22	Laluan mata alat-mirip gading	48
Rajah 2.23	Laluan mata alat-mirip gading untuk hilangkan sisa bahan kerja	48
Rajah 2.24	Penentuan kawasan lebihan	49
Rajah 2.25	Penambahan laluan mata alat pada kawasan lebihan (a) bucu (b) tengah (c) leher	50
Rajah 2.26	Penambahan gegelung pada kawasan lebihan menggunakan gegelung tunggal (a) Laluan konvensional (b) Gegelung tunggal	51
Rajah 2.27	Penambahan gegelung pada kawasan lebihan menggunakan dua gegelung (a) Laluan konvensional (b) Gegelung berganda	52
Rajah 2.28	Penentuan kawasan lebihan pada bucu	53
Rajah 2.29	(a) Gambar rajah Voronoi (b) Laluan mata alat tambahan	54
Rajah 2.30	Penentuan kawasan lebihan pada bucu di dalam kontur selari	55

Rajah 2.31	Pembinaan lengkok	57
Rajah 2.32	Penghasilan lengkung (a) Penetapan lengkok masuk dan lengkok keluar (b) Penyambungan lengkung	58
Rajah 2.33	Penghasilan laluan mata alat tambahan yang lengkap	58
Rajah 2.34	Pertindihan laluan mata alat pada lengkok yang sama	59
Rajah 2.35	Peninggalan jejak feromon oleh semut	60
Rajah 2.36	Laluan semut berdasarkan kepekatan feromon	62
Rajah 2.37	Perbezaan pergerakan mata alat antara (a) Secara rambang dan (b) Algoritma genetik(GA)	69
Rajah 2.38	Ringkasan kajian kepustakaan	73
Rajah 3.1	Carta alir kaedah dan kajian pengoptimuman jarak laluan mata alat	76
Rajah 3.2	Bentuk bahan kerja pertama (a) 3-dimensi (b) Pandangan atas	78
Rajah 3.3	Bentuk bahan kerja kedua (a) 3-Dimensi (b) Pandangan atas	79
Rajah 3.4	Perbezaan antara ofset bucu dan ofset sisi (a) ofset bucu (b) ofset sisi	80
Rajah 3.5	Carta alir bagi proses ofset kontur selari	81
Rajah 3.6	Pengiraan titik ofset (a) $0 < \theta < 180^\circ$ (b) $180^\circ < \theta < 360^\circ$	82
Rajah 3.7	Profil sempadan	83
Rajah 3.8	Algoritma bagi pengiraan titik ofset	83
Rajah 3.9	Ofset pertama	84
Rajah 3.10	Penghasilan gelung global tidak sah pada ofset kedua	84

Rajah 3.11	Penentuan kecerunan bagi setiap garisan persilangan	85
Rajah 3.12	Algoritma bagi menentukan titik persilangan	86
Rajah 3.13	Penghapusan gelung global tidak sah	86
Rajah 3.14	Pembinaan ofset selepas penghapusan gelung global tidak sah	86
Rajah 3.15	Simulasi laluan mata alat	87
Rajah 3.16	Pemilihan sudut bagi formula kawasan lebihan	88
Rajah 3.17	Penentuan sudut bagi memastikan kewujudan kawasan lebihan	89
Rajah 3.18	Kawasan lebihan tidak dipotong pada bahagian bucu	90
Rajah 3.19	Penentuan koordinat pada kawasan lebihan tidak dipotong	91
Rajah 3.20	Aliran proses bagi ACO	93
Rajah 3.21	Penempatan semut pada titik pertama	94
Rajah 3.22	Koordinat kawasan lebihan	95
Rajah 3.23	Algoritma untuk pemilihan titik seterusnya berdasarkan kaedah roda rolet	96
Rajah 3.24	Aliran proses bagi ACO-PB	98
Rajah 3.25	Dua titik pada kawasan lebihan	99
Rajah 3.26	Pemilihan titik pada kawasan lebihan berdasarkan ACO-PB	100
Rajah 3.27	Penomboran kawasan lebihan	101
Rajah 3.28	Penentuan jarak kontur selari	105
Rajah 3.29	Penentuan jarak kontur selari model kedua	106

Rajah 3.30	Penetapan teknik pemesanan dan nilai selang antara kontur	107
Rajah 3.31	Penjanaan laluan mata alat (a) Pandangan atas (b) 3 dimensi	108
Rajah 3.32	G-kod fasa pertama	109
Rajah 3.33	Laluan mata alat dan G-kod fasa kedua	110
Rajah 3.34	Pergerakan tidak produktif di dalam laluan mata alat tambahan	111
Rajah 3.35	Pemindahan G-kod pada kawalan mesin (a) Penyimpanan fail G-kod (b) Simulasi G-kod dan pemeriksaan laluan mata alat	112
Rajah 3.36	Mesin Kawalan Komputer Berangka, Deckel DC70V	112
Rajah 3.37	Mesin Kawalan Komputer Berangka, Hermle UWF 900	113
Rajah 3.38	Bahan kerja Aluminium A6061 (a) model pertama (b) model kedua	114
Rajah 3.39	Pemasangan bahan kerja	114
Rajah 3.40	Pengawal mesin bagi CNC mesin Hermle UWF 900	116
Rajah 3.41	Laluan mata alat berdasarkan kaedah penyambungan lengkok	117
Rajah 4.1	Kontur selari berdasarkan ω , 5.7 mm	120
Rajah 4.2	Kontur selari berdasarkan ω , 5.8 mm	120
Rajah 4.3	Kontur selari berdasarkan ω , 5.9 mm	121
Rajah 4.4	(a) Penghasilan gelung global tidak sah pertama (b) Penghasilan gelung global tidak sah kedua (c) Kontur selari lengkap	122
Rajah 4.5	Pengesanan kawasan lebihan (a) $\omega=5.6$ mm (b) $\omega=5.7$ mm (c) $\omega=5.9$ mm	124

Rajah 4.6	Pengesanan kawasan lebihan model kedua (a) simulasi laluan mata alat (b) analisis geometri	125
Rajah 4.7	Penghasilan laluan mata alat yang tidak sah	127
Rajah 4.8	Kawasan lebihan berdasarkan $\omega=5.7$ mm	132
Rajah 4.9	Graf iterasi vs jarak minimum	133
Rajah 4.10	Laluan mata alat tambahan optimal berdasarkan ACO-PB	134
Rajah 4.11	Laluan mata alat keseluruhan bagi model pertama	134
Rajah 4.12	Penghasilan kawasan lebihan tidak dipotong (a) Pandangan atas (b) 3 Dimensi	136
Rajah 4.13	Proses pemesanan ACO-PB $\omega=5.7$	136
Rajah 4.14	Pergerakan tidak produktif di dalam proses pemesanan	137
Rajah 4.15	Perbezaan laluan mata alat (a) ACO-PB (b) Lin et al. (2013)	138
Rajah 4.16	Uji kaji pemesanan (a) Laluan mata alat berdasarkan ACO-PB (b) Laluan mata alat berdasarkan Lin et al. (2013)	140
Rajah 4.17	Penghasilan laluan mata alat tambahan (a) ACO biasa (b) ACO-PB	142
Rajah 4.18	Penghasilan laluan mata alat berdasarkan ACO biasa	143
Rajah 4.19	Laluan mata alat berdasarkan ACO	143
Rajah 4.20	Laluan mata alat tidak produktif	144
Rajah 4.21	Laluan mata alat tambahan bagi ω , 5.6 mm	145
Rajah 4.22	Laluan mata alat tambahan bagi ω , 5.7 mm	145
Rajah 4.23	Laluan mata alat tambahan bagi ω , 5.9 mm	146
Rajah 4.24	Penghasilan kawasan lebihan yang berbeza (a) $\omega=5.6$ (a) $\omega=5.7$ (a) $\omega=5.9$	147

Rajah 4.25	Laluan mata alat keseluruhan (a) $\omega=5.6$ mm (b) $\omega=5.7$ mm (c) $\omega=5.9$ mm	148
Rajah 4.26	Pemesinan kontur selari berdasarkan ACO-PB bagi $\omega=5.6$ mm	149
Rajah 4.27	Pemesinan awal kontur selari berdasarkan ACO-PB bagi $\omega=5.9$ mm	150
Rajah 4.28	Perbandingan masa antara ACO-PB dan uji kaji	151
Rajah 4.29	Perbezaan laluan mata alat, $\omega=5.6$ mm (a) ACO (b) ACO-PB	152
Rajah 4.30	Perbezaan laluan mata alat, $\omega=5.9$ mm (a) ACO (b) ACO-PB	153
Rajah 4.31	Masa pemesinan kasar bagi nilai selang berbeza berdasarkan ACO dan ACO-PB	154
Rajah 4.32	Penghasilan kawasan lebihan di dalam MasterCAM	155
Rajah 4.33	Pemesinan poket berdasarkan sistem asal MasterCAM	156
Rajah 4.34	Laluan mata alat tambahan berdasarkan (a) ACO biasa (b) ACO-PB	157
Rajah 4.35	Perbezaan laluan mata alat tambahan (a) ACO-PB (b) kaedah penyambungan lengkok kontur selari	159
Rajah 4.36	Kawasan lebihan yang berlaku berdasarkan proses Pemesinan (a) Pandangan atas (b) 3 Dimensi	161
Rajah 4.37	Pemesinan kasar kontur selari berdasarkan ACO-PB bagi $\omega=5.8$ mm	162

SENARAI SIMBOL

α	Pekali feromon
β	Pekali jarak songsang
τ	Kemas kini feromon
ρ	Pekali kadar pengewapan
ω	Nilai selang antara kontur
m	Bilangan semut
θ	Sudut
r	Jejari mata alat (mm)
m	Bilangan semut
T_{mk}	Masa pemesinan kasar
L_T	Jumlah jarak laluan mata alat
L_{ks}	Jarak laluan mata alat kontur selari
L_{lt}	Jarak laluan mata alat tambahan
L_{tp}	Jarak laluan tidak produktif
f	Kadar suapan
TL	Jangka hayat mata alat
C	Pemalar Perkadaran
D	Diameter mata alat (mm)
V	Kelajuan pemotongan
S	Suapan per gigi
b	Lebar pemotongan
d	Kedalaman pemotongan
z	Bilangan gigi mata alat

SENARAI SINGKATAN

ACO	Pengoptimuman Koloni Semut
ACO-PB	Pengoptimuman Koloni Semut-aturan peralihan baru
CAD	Reka bentuk Terbantukan Komputer
CAM	Pembuatan Terbantukan Komputer
CNC	Kawalan Kaedah Berangka
DOE	Reka bentuk eksperimen
GIR	Penghapusan Global Tidak Sah
LIR	Penghapusan Setempat Tidak Sah
RSM	Kaedah Sambutan Permukaan
GA	Algoritma Genetik
PSO	Pengoptimuman Kawanan Zarah
SA	Simulasi Penyepuhlindungan
PWID	Pengesanan Gangguan Pasangan demi pasangan

SENARAI ISTILAH

Aturan peralihan	Transition rules
Degenarasi	Degeneration
Gelung global tidak sah	Global invalid loop
Gelung setempat tidak sah	Local invalid loop
Iterasi	Iteration
Kedalaman pemotongan	Axial depth of cut
Kelebaran pemotongan	Radial depth of cut
Pulau	Island
Kawasan lebih tidak terpotong	Uncut region
Pemesinan kemasan	Finishing
Nilai selang	Radial with
Lengkung susunan titik	Point-sequence curve
Nilai selang antara kontur	Tool path interval
Parameter mempengaruhi feromon	Weight of trail
Parameter mempengaruhi jarak songsang	Weight of visibility
Pemesinan kasar	Roughing
Penumpuan	Convergence
Pemproses	Processor
Feromon	Pheromone
Sentuhan mata alat	Tool engagement

BAB I

PENGENALAN

1.1 Pengenalan

Pada masa kini, penggunaan mesin Kawalan Berkomputer Berangka (CNC) banyak digunakan di dalam industri pembuatan ekoran keupayaannya menghasilkan laluan mata alat dan program Kawalan Berkomputer (NC) secara automatik bagi pelbagai jenis proses pemesinan. Antara proses yang banyak menggunakan mesin CNC adalah proses pengisaran poket. Proses pengisaran poket sering digunakan dalam menghasilkan produk di dalam bidang pembuatan acuan. Bagi kebanyakan proses kisaran poket, laluan mata alat secara automatik dihasilkan menggunakan perisian Reka bentuk Terbantuan Komputer/ Pembuatan Terbantuan Komputer (CAD/CAM). Lazimnya, reka bentuk bahan kerja dibina menggunakan perisian CAD dan laluan mata alat disimulasi dalam perisian CAM bagi menjana kod CNC. Kod CNC yang terhasil ini menghasilkan pergerakan mata alat yang digunakan di dalam mesin CNC. Dari semasa ke semasa, terdapat pembaharuan dan kajian dilakukan bagi meningkatkan kecekapan dan keberkesanan proses pemesinan menggunakan CNC. Masa pemotongan yang singkat adalah salah satu kriteria penting di dalam menentukan keberkesanan sesuatu proses pemesinan kerana ia mempengaruhi kadar pengeluaran dan kos pembuatan (Hatna et al. 1998; Nafis et al. 2014).

Masa pemotongan (T_m) di dalam proses pengisaran poket dapat dikurangkan dengan meningkatkan kelajuan pemotongan (v) atau mengurangkan jarak laluan mata alat (L_t) (Pateloup et al. 2004). Jarak laluan mata alat dan masa pemotongan juga dipengaruhi oleh kedalaman pemotongan (d), dan lebar pemotongan (b) (Heo et al. 2010). Bagi pemesinan kisar poket 2.5D, bahan kerja akan dikeluarkan dengan beberapa lapisan yang diwakili oleh kedalaman pemotongan. Heo et al. 2010 telah

menjalankan kajian bagi menentukan nilai kedalaman dan kelebaran pemotongan bagi menghasilkan masa pemotongan yang minimum dengan mengambil kira kestabilan dan getaran mat alat. Bagi memastikan masa pemotongan yang terhasil adalah minimum, adalah penting menentukan parameter-parameter yang terlibat adalah optimal sebelum ditetapkan dalam mesin CNC. Bagi menentukan parameter yang optimal, kaedah pengoptimuman digunakan untuk meminimumkan masa pemotongan. Secara umumnya, terdapat dua kaedah pengoptimuman yang digunakan iaitu kaedah konvensional dan bukan konvensional. Antara kaedah konvensional yang sering digunakan bagi proses pengoptimuman ialah Kaedah Gerak Balas Permukaan (RSM) (Yazdi & Khorram 2010) dan Kaedah Taguchi (Moshat et al. 2010). Manakala kaedah tidak konvensional adalah seperti Algoritma Genetik (GA), Pengoptimuman Koloni Semut (ACO), Pengoptimuman Kawan Zarah (PSO) dan Simulasi Penyepuh Lindapan (SA). Terdapat beberapa kajian dilakukan bagi mengurangkan masa pemotongan berdasarkan kaedah tidak konvensional, antaranya, penentuan parameter yang optimal dengan menetapkan masa pemotongan sebagai fungsi objektif (Heo et al. 2010; Shivasheshadri et al. 2012). Selain itu, masa pemotongan juga dapat dikurangkan dengan meminimumkan masa pemotongan tidak produktif (Gupta et al. 2011a; Oysu & Bingul 2009).

Di dalam proses kisan poket, terdapat dua peringkat pemotongan iaitu pemesinan kasar dan kemas. Pemesinan kasar adalah satu proses memotong sejumlah bahan kerja untuk menghasilkan bentuk yang hampir menyamai geometri komponen akhir. Seterusnya, proses kemas dilakukan untuk mengeluarkan baki bahan kerja yang tertinggal bagi mewujudkan kemas permukaan yang sesuai dan menghasilkan dimensi yang tepat. Secara asasnya, peringkat pemesinan kasar memfokuskan kepada pemotongan sejumlah bahan kerja, manakala peringkat kemas memfokus terhadap kemas permukaan dan ketepatan dimensi. Peringkat pemesinan kasar mengambil masa lebih dari 50% daripada jumlah masa pemotongan bergantung pada kerumitan sesuatu bentuk dan geometri bahan kerja dan proses ini 5-10 kali lebih lama dari proses kemas (Hatna et al. 1998; Liang et al. 1996). Selain itu, pemesinan kasar juga merupakan proses penting dalam mempengaruhi keseluruhan masa pemotongan dan kejutuan produk (Nafis et al. 2014).

Pemilihan teknik pemotongan yang sesuai sangat penting bagi memastikan masa pemotongan yang terhasil pada peringkat pemesinan kasar adalah rendah. Terdapat beberapa teknik pemesinan yang digunakan seperti kontur selari, zig-zag dan satu-hala. Di antara kaedah-kaedah ini, kaedah kontur selari dapat menghasilkan masa pemotongan yang lebih rendah berbanding kaedah zig-zag dan satu hala sama ada semasa proses pemesinan kasar atau proses kemasan (Hatna et al. 1998; Kim & Choi 2002; Laurent 2012). Laluan mata alat secara kontur selari adalah satu teknik pemotongan dengan mata alat sentiasa bersentuhan dengan bahan kerja dan ini dapat mengurangkan masa tidak produktif yang digunakan bagi penarikan balik dan penempatan mata alat. Selain itu, ia juga boleh mengekalkan penggunaan yang konsisten apabila kaedah pemotongan secara pengisaran konvensional atau pengisaran potong bawah digunakan secara alternatif. Oleh sebab ini, kaedah kontur selari lebih banyak digunakan secara meluas di dalam proses pengisaran poket terutama bagi mengeluarkan bahan kerja dalam jumlah yang banyak (Pamali 2004).

Walaupun begitu, terdapat beberapa kajian yang dilakukan bagi meningkatkan keberkesanan kaedah pemesinan secara kontur selari di dalam proses pengisaran poket. Antaranya dengan menghasilkan jarak laluan mata alat yang lebih rendah dengan menetapkan nilai selang antara kontur (ω) lebih besar dari jejari mata alat sepanjang proses pemesinan kasar. Penetapan ω lebih besar dari jejari mata alat dapat mengurangkan keseluruhan jarak laluan mata alat dan dapat mengurangkan masa pemotongan. Walau bagaimanapun peningkatan nilai ω ini akan menghasilkan kawasan lebihan tidak dipotong pada bahagian bucu, tengah dan leher (Choi & Kim 1997). Masalah kawasan lebihan tidak terpotong ini dapat diatasi dengan menambahkan satu laluan mata alat tambahan sepanjang kawasan lebihan. Beberapa kaedah diperkenalkan bagi menghilangkan kawasan lebihan ini, seperti memasukkan satu segmen laluan mata alat tambahan secara lurus (Choi & Kim 1997), menghasilkan dan menambahkan laluan mata alat yang berbentuk gegelung (Choy & Chan 2003), menghasilkan laluan mata alat berdasarkan kaedah gambar rajah Voronoi (Mansor et al. 2006) dan membina algoritma berdasarkan kaedah penyambungan lengkok berdasarkan pusat kontur selari (Lin et al. 2013).

RUJUKAN

- Abbas, A. T., Aly, M. F. & Hamza, K. 2011. Optimum drilling path planning for a rectangular matrix of holes using ant colony optimisation. *International Journal of Production Research* 49(19):5877–5891.
- Abbas, A. T., Hamza, K. & Aly, M. F. 2014. CNC Machining Path Planning Optimization for Circular Hole Patterns via a Hybrid Ant Colony Optimization Approach. *Mechanical Engineering Research* 4(2): 16–29.
- Abu Qudeiri, J., Yamamoto, H. & Ramli, R. 2007. Optimization of Operation Sequence in CNC Machine Tools Using Genetic Algorithm. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* 1(2): 272–282.
- Adam, A., Faiz, A., Abidin, Z., Ibrahim, Z., Husain, A. R., Yusof, Z. & Ibrahim, I. 2010. A Particle Swarm Optimization Approach to Robotic Drill Route Optimization. *International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation*. 1–5.
- Aggarwal, M. 2012. Compute Travelling Salesman Problem Using Ant Colony Optimization. *International Journal of Computing & Business Research*. 1: 1–6.
- Ahmad, N., Tanaka, T. & Saito, Y. 2005. Optimization of Cutting Parameters for End Milling. *International Conference on Mechanical Engineering 2005*. 1–5.
- Ancău, M. 2008. The optimization of printed circuit board manufacturing by improving the drilling process productivity. *Computers & Industrial Engineering* 55(2): 279–294.
- Ansalam Raj, T. G. 2013. A Simulated Annealing Algorithm For The Optimization Of Surface Finish In Dry Turning Of SS 420 Materials. *International Journal of Engineering Research & Technology* 2(6): 482–495.
- António, C. A., Castro, C. F. & Davim, J. P. 2009. Optimisation of multi-pass cutting parameters in face-milling based on genetic search. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 44: 1106–1115.
- Aoyama, E., Hirogaki, T., Katayama, T. & Hashimoto, N. 2004. Optimizing drilling conditions in printed circuit board by considering hole quality. *Journal of Materials Processing Technology* 155–156: 1544–1550.
- Arkin, E. M., Held, M. & Smith, C. L. 1997. Optimization Problems Related to Zigzag Pocket Machining. *Algorithmica* 26(2): 197–236.
- Azeem, A. 2007. Selection of Efficient Cut Pattern. *International Conference on Mechanical Engineering 2007*. 29–31.

- Bahloul, E., Brioua, M. & Rebiai, C. 2015. An Efficient Contour Parallel Tool Path Generation for Arbitrary Pocket Shape without Uncut Regions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 16(6): 1157–1169.
- Banerjee, A., Feng, H. & Bordatchev, E. V. 2012. Process planning for Floor machining of 2½D pockets based on a morphed spiral tool path pattern. *Computers & Industrial Engineering*, 63, 971–979.
- Baskar, N., Asokan, P., Prabhakaran, G. & Saravanan, R. 2005. Optimization of Machining Parameters for Milling Operations Using Non-conventional Methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 25: 1078–1088.
- Bassi, R. 2012. *Mold Feature Recognition using Accessibility Analysis for Automated Design of Core , Cavity , and Side-Cores and Tool-Path Generation of Mold Segments*. University of Waterloo.
- Belloufi, A., Assas, M. & Rezgui, I. 2013. Optimization of Turning Operations by Using a Hybrid Genetic. *Journal of Applied Research and Technology* 11(1): 88–94.
- Bhuiyan, T. H. & Ahmed, I. 2013. Optimization of cutting parameters in turning process. *Journal of Production Engineering* 16(2): 11–19.
- Blum, C. 2005. Ant colony optimization: Introduction and recent trends. *Physics of Life Reviews* 2(4): 353–373.
- Bouard, M., Pateloup, V. & Armand, P. 2011. Pocketing toolpath computation using an optimization method. *Computer-Aided Design* 43(9): 1099–1109.
- Chang, P., Hsieh, J. & Wang, C. 2007. Adaptive multi-objective genetic algorithms for scheduling of drilling operation in printed circuit board industry. *Applied Soft Computing* 7(1): 800–806.
- Chaturvedi, R. & Banka, H. 2014. Modified Ant Colony Optimization Algorithm for Travelling Salesman Problem. *International Journal of Computer Applications* 97(10): 20–24.
- Chauhan, P., Deep, K. & Pant, M. 2011. Optimizing CNC Turning Process Using Real Coded Genetic Algorithm and Differential Evolution. *Global Journal of Technology and Optimization* 2(1): 157–165.
- Chen, W., Lim, E., Kanagaraj, G. & Ponnambalam, S. G. 2014. PCB Drill Path Optimization by Combinatorial Cuckoo Search Algorithm. *The Scientific World Journal* 1(1), 1–11.
- Choi, B. K. & Kim, B. H. 1997. Die-cavity pocketing via cutting simulation. *Computer-Aided Design* 29(12): 837–846.

- Choi, B. K. & Park, S. C. 1999. A pair-wise offset algorithm for 2D point-sequence curve. *Computer-Aided Design* 31(12): 735–745.
- Choy, H. S. & Chan, K. W. 2003. A corner-looping based tool path for pocket milling. *Computer-Aided Design* 35(2): 155–166.
- C Cus, F., Balic, J. & Zuperl, U. 2009. Hybrid ANFIS-ants system based optimisation of turning parameters. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 36(1): 79–86.
- Dai, N., Dong, G. L., Liao, W. H. & Sun, Y. C. 2013. Dental restoration contour-parallel offset tool path links based on graph model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 66: 555–563.
- Daneshmand, S., Abdolhosseini, M. M. & Aghanajafi, C. 2011. Investigating the Optimal Tool Path Strategies Based on Machining Time in CAD-CAM. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 5(12): 2320–2326.
- Daneshmand, S., Mirabdolhosayni, M. & Aghanajafi, C. 2013. Sifting Through the Optimal Strategies of Time-Based Tools Path Machining in Software CAD-CAM. *Middle East Journal of Scientific Research* 13(7): 844–849.
- Dawson, L. & Stewart, I. 2013. Improving Ant Colony Optimization performance on the GPU using CUDA. *2013 IEEE Congress of Evolutionary Computation, CEC 2013*. 1901–1908.
- Deepak, U. 2011. Optimization of Milling Operation Using Genetic and PSO Algorithm. *Bonfring International Journal of Software Engineering and Soft Computing* 1: 8–14.
- Dorigo, M. & Caro, G. Di. 1999. Ant colony optimization : A new meta-heuristic Ant Colony Optimization : A New Meta-Heuristic. *Proceedings of the 1999 Congress Evolutionary Computation (CEC)*. 1–9.
- Dorigo, M., Maniezzo, V. & Colorni, A. 1996. Ant System : Optimization by a Colony of Cooperating Agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 26(1): 29–41.
- Dorigo, M. & Stützle, T. 2004. *Ant Colony Optimization*. Library of Congress Cataloging.
- Eiben, E., Hinterding, R. & Michalewicz, Z. 1999. Parameter Control in Evolutionary Algorithms. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation* 3(2): 124–141.
- El-Midany, T. T., Elkeran, A. & Tawfik, H. 2006. Toolpath pattern comparison contour-parallel with direction-parallel. *Proceeding of the Geometric Modeling and Imaging New Trends*. 77–82.

- Eldos, T., Kanan, A. & Aljumah, A. 2013. Solving The Printed Circuit Board Drilling Problem By Ant Colony Optimization Algorithm. *Proceedings of the World on Engineering and Computer Science*. 23–25.
- Ganesan, H. 2011. Optimization of Machining Parameters in Turning Process Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization with Experimental Verification. *International Journal of Engineering Science and Technology* 3(2), 1091–1102.
- Ghaiebi, H. & Solimanpur, M. 2007. An ant algorithm for optimization of hole-making operations. *Computers & Industrial Engineering* 52: 308–319.
- Guo, Y. W., Mileham, A. R., Owen, G. W., Maropoulos, P. G. & Li, W. D. 2009. Operation sequencing optimization for five-axis prismatic parts using a particle swarm optimization approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 223(5): 485–497.
- Gupta, A. K., Chandna, P. & Tandon, P. 2011a. Hybrid genetic algorithm for minimizing non productive machining time during 2.5 D milling. *International Journal of Engineering, Science and Technology* 3(1): 183–190.
- Gupta, A. K., Chandna, P. & Tandon, P. 2011b. Optimization of machining parameters and tool selection in 2 . 5D milling using Genetic Algorithm. *International Journal of Innovative Technology & Creative Engineering* 1(8): 21–27.
- Hatna, A., Grieve, R. & Broomhead, P. 1998. Automatic CNC milling of pockets: geometric and technological issues. *Computer Integrated Manufacturing Systems* 11(4): 309–330.
- Hbaieb, M., Othmani, R. & Bouzid, W. 2010. Time modeling in high-speed machining of mold pocket. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 53(1–4): 113–120.
- Heinonen, J. & Pettersson, F. 2007. Job-shop Scheduling and Visibility Studies with a Hybrid ACO Algorithm. *Swarm Intelligence: Focus on Ant and Particle Swarm Optimization*. 355–372. Austria: Itech Education and Publishing.
- Held, M. 1991. *On the Computational Geometry of Pocket Machining*. Springer Berlin Heidelberg.
- Heo, E. Y., Merdol, D. & Altintas, Y. 2010. High speed pocketing strategy. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 3(1), 1–7.
- Hinduja, S., Mansor, M. S. A. & Owodunni, O. O. 2010. Voronoi-diagram-based linking of contour-parallel tool paths for two-and-a-half-dimensional closed-pocket machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture* 224(B9): 1329–1350.

- Hlaing, Z., Khine, M. A., Chi, Z., Su, S., Khine, M. A. & Hlaing, Z. 2011. An Ant Colony Optimization Algorithm for Solving Traveling Salesman Problem. *International Conference on Information Communication and Management* 16: 54–59.
- Hong, X., Yuan, L., Kaifu, Z., Jianfeng, Y., Zhenxing, L. & Jianbin, S. 2010. Multi-objective Optimization Method for Automatic Drilling and Riveting Sequence Planning. *Chinese Journal of Aeronautics* 23(1): 734–742.
- Hricova, J. 2014. Design of End Mill Geometry for Aluminium Alloy Machining. *Acta Facultatis Technicae Zvolen* 2014(2): 97–105.
- Hsieh, H. T. & Chu, C. H. 2013. Improving optimization of tool path planning in 5-axis flank milling using advanced PSO algorithms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29(3): 3–11.
- Jabri, A., Barkany, A. El & Khalfi, A. El. 2013. Multi-Objective Optimization Using Genetic Algorithms of Multi-Pass Turning Process. *Scientific Research* 1(5): 601–610.
- Jeevannavar, A. & Hussain, R. 2014. Process Modelling , Simulation and Experimental Validation for Prediction of Chip Morphology During High Speed Machining of Al 2024-T3. *SASTech Journal* 13(1): 80–87.
- Jiang, Z., Feng, X., Feng, X. & Liu, Y. 2010. Contour-Parallel Tool-path planning of free surface using Voronoi diagram Approach. *International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering(ICACTE)*. 302–305.
- Kariuki, L. W., Ikua, B. W. & Nyakoe, G. N. 2014. Generation and Optimization of Pocket Milling Tool Paths - A Review. *International Conference on Sustainable Research and Innovation*. 129–133.
- Kiani, K., Sharifi, M. & Shakeri, M. 2013. Optimization of Cutting Trajectory to Improve Manufacturing Time in Computer Numerical Control Machine using Ant Colony Algorithm. *Journal of Engineering Manufacture* 228(7): 1–6.
- Kim, B. H. & Choi, B. K. 2002. Machining efficiency comparison direction-parallel tool path with contour-parallel tool path. *CAD Computer Aided Design* 34(2), 89–95.
- Kim, B. K., Park, J. Y., Lee, H. C. & Kim, D. 2003. Determination of Cutting Direction for Minimization of Tool Retraction Length in Zigzag Pocket Machining. *Computational Science and Its Applications*. 680–689.
- Kim, H. C. 2010a. Optimum tool path generation for 2.5D direction-parallel milling with incomplete mesh model. *Journal of Mechanical Science and Technology* 24(5): 1019–1027.

- Kim, H. C. 2010b. Tool path generation for contour parallel milling with incomplete mesh model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 48: 443–454.
- Kim, H. C., Lee, S. G. & Yang, M. Y. 2006. A new offset algorithm for closed 2D lines with Islands. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 29: 1169–1177.
- Kolahan, F. & Abachizadeh, M. 2008. Optimizing Turning Parameters for Cylindrical Parts Using Simulated Annealing Method. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* 2(10): 1125–1128.
- Kumar, A. & Pachauri, P. P. 2012. Optimization Drilling Sequence by Genetic Algorithm. *International Journal of Scientific and Research Publications* 2(9): 1–7.
- Kumar, S. & Garg, K. 2011. Genetic Algorithm Optimization of Operating Parameters for Multiobjective Multipass End Milling. (S. V Sathyanarayana & J. Stephen, Eds.) *Proc. of Int. Joint Colloquium on Emerging Technologies in Computer Electrical and Mechanical 2011*. 125–129.
- Kumar, S., Gupta, A. K. & Chandna, P. 2014. Minimization of Non-Productive Time during 2.5D Milling. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering* 8(6): 1147–1152.
- Kumbharana, S. N. & Pandey, P. G. M. 2013. A Comparative Study of ACO , GA and SA for Solving Travelling Salesman Problem. *International Journal of Societal Applications of Computer Science* 2(2): 224–228.
- Lai, W., Faddis, T. & Sorem, R. 2000. Incremental algorithms for finding the offset distance and minimum passage width in a pocket machining toolpath using the Voronoi technique. *Journal of Materials Processing Technology* 100: 30–35.
- Lai, W. H. 2000. Modeling of cutting forces in end milling operations. *Tamkang Journal of Science and Engineering* 3(1): 15–22.
- Lambregts, C. A. H., Delbressine, F. L. M., Vries, W. A. H. & Wolf, A. C. H. 1996. An efficient Automatic Tool Path Generator for D free-form Pockets. *Computers in Industry* 29: 151–157.
- Laskar, M. N. U., Viet, H. H., Choi, S. Y., Ahmed, I., Lee, S. & Chung, T. C. 2014. Offsetting obstacles of any shape for robot motion planning. *Robotica*. 1–19.
- Laurent, V. 2012. Optimization of the machining of RTM moulds. *National Congress on Theoretical and Applied Mechanics*. 9–10.
- Leandro, C. D. O. & Tsuzuki, M. D. S. G. 2011. Optimization of the 2 1/2 D Pocket Machining Using Multiple Tools. *Advanced Materials Research* 223: 918–927.

- Lee, C. S., Phan, T. T. & Kim, D. S. 2009. 2D curve offset algorithm for pockets with islands using a vertex offset. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 10(2): 127–135.
- Lee, Y. Z. & Ponnambalam, S. G. 2010. Optimization of Multipass Turning using Particle Swarm Optimization. *Proceeding of the 7th International Symposium on Mechatronics and its Applications*.1–6.
- Li, B. A. 2011. Cutting parameter optimization in milling operations by various solution methods. *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. 422–427.
- Li, Q., Wang, R., Liu, Q. J., Wu, R. Z., Shao, M. K. & Liao, C. J. 2011. Optimization of Milling Parameters Based on Genetic Algorithm. *Applied Mechanics and Materials* 141: 403–407.
- Liang, M., Ahamed, S. & Berg, B. 1996. A STEP based tool path generation system for rough machining of planar surfaces. *Computers in Industry* 32: 219–231.
- Lin, Z., Fu, J., Shen, H. & Gan, W. 2013. Global uncut regions removal for efficient contour-parallel milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68: 1241–1252.
- Liu, X., Hong, Y., Zhonghua, N. & Jianchang, Q. 2013. Process planning optimization of hole-making operations using ant colony algorithm. *International Journal Advance Manufacturing Technology* 69(1): 1–9.
- Liu, X., Yi, H. & Ni, Z. 2010. Application of ant colony optimization algorithm in process planning optimization. *Journal of Intelligent Manufacturing* 24(1): 1–13.
- Luo, X., Yu, F. & Zhang, J. 2006. Study of Parametric Relation in Ant Colony Optimization Approach to Traveling Salesman Problem. *Computational Intelligence and Bioinformatics*.22–32. Springer Berlin Heidelberg.
- Mahesh, B. T. & Radhika, N. 2015. Experimental Investigation of Optimal Machining Parameters of Mild Steel in CNC Milling Particle Swarm Optimization. *International of Computer Science* 3(1): 13–28.
- Mansor, M. S. A., Hinduja, S. & Owodunni, O. O. 2006. Voronoi diagram-based tool path compensations for removing uncut material in 2½D pocket machining. *Computer-Aided Design* 38: 194–209.
- Mansour, G., Tsagaris, A. & Sagris, D. 2013. CNC Machining Optimization by Genetic Algorithm Using CAD Based System. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies* 5(1): 1–6.
- Marko, H., Simon, K., Tomaz, I., Matej, P., Joze, B. & Miran, B. 2014. Turning Parameters Optimization using Particle Swarm Optimization. *Procedia Engineering* 69: 670–677.

- Mohamad, N. & Ariffin, M. K. a. 2013. Development of genetic algorithm toolbox using MATLAB in cutting tool path optimization. *Scientific Research and Essays* 8(38): 1848–1857.
- Moshat, S., Datta, S., Bandyopadhyay, A. & Pal, P. K. 2010. Optimization of CNC end milling process parameters using PCA-based Taguchi method. *International Journal of Engineering, Science and Technology* 2(1): 92–102.
- Mukherjee, I. & Ray, P. K. 2006. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers & Industrial Engineering* 50(1–2): 15–34.
- Nabeel, P., Abid, K. & Abdulrazzaq, H. F. 2014. Tool Path Optimization of Drilling Sequence in CNC Machine Using Genetic Algorithm. *Innovative Systems Design and Engineering* 5(1): 15–26.
- Nafis, M., Zahid, O., Case, K. & Watts, D. 2014. Optimization of roughing operations in CNC machining for rapid manufacturing processes. *Production & Manufacturing Research* 2(1): 519–529.
- Nallakumarasamy, G., Srinivasan, P., Raja, K. V. & Malayalamurthi, R. 2011. Optimization of Operation Sequencing in CAPP Using Superhybrid Genetic Algorithms-Simulated Annealing Technique. *ISRN Mechanical Engineering* 1: 1–7.
- Narooei, K. D., Ramli, R., Nizam, M., Rahman, A., Ibrahimi, F. & Qudeiri, J. A. 2014. Tool Routing Path Optimization for Multi-Hole Drilling Based on Ant Colony Optimization. *World Applied Sciences Journal* 32(9): 1894–1898.
- Onwubolu, G. C. & Clerc, M. 2004. Optimal path for automated drilling operations by a new heuristic approach using particle swarm optimization. *International Journal of Production* 42(3): 37–41.
- Othman, M.H., A.F.Z. Abidin, A. Adam, Z.M. Yusof, Z. Ibrahim, S. M. M. and L. Y. Y. 2013. Route Planning Analysis in Holes Drilling Process Using Magnetic Optimization Algorithm for Electronic Manufacturing Sector. *Proceeding of First International Conference on Robotic Automation System*. Vol. 21: 91–97.
- Oysu, C. & Bingul, Z. 2009. Application of heuristic and hybrid-GASA algorithms to tool-path optimization problem for minimizing airtime during machining. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22(3): 389–396.
- Palanisamy, P., Rajendran, I. & Shanmugasundaram, S. 2007. Optimization of machining parameters using genetic algorithm and experimental validation for end-milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32: 644–655.
- Pamali, A. P. 2004. *Using Clothoidal Spiral to Generate Smooth Tool Paths for High Speed Machining*. North Carolina State University.

- Pansare, V. B., Kavade, M. V & Sangali, S. D. 2012. Optimization of Cutting Parameters in Multipass Turning Operation using Ant Colony Algorithm. *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology* 2(4): 955–960.
- Park, S. C. & Choi, B. K. 2001. Uncut free pocketing tool-paths generation using pairwise offset algorithm. *Computer-Aided Design* 33(10): 739–746.
- Park, S. C., Chung, Y. C. & Choi, B. K. 2003. Contour-parallel offset machining without tool-retractions. *Computer-Aided Design* 35(9): 841–849.
- Parsopoulos, K. E. & Vrahatis, M. N. 2010. *Particle Swarm Optimization and Intelligence: Advances and Applications*. Premier Reference Source. United States of America: Information Science Reference.
- Pateloup, V., Duc, E. & Ray, P. 2004. Corner optimization for pocket machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44: 1343–1353.
- Pavanaskar, S. S. 2014. *Improving Energy Efficiency in CNC Machining*. University of California, Berkeley.
- Petkovic, D. & Radovanovic, M. 2013. Using Genetic Algorithms for Optimization of Turning Machining Process. *Journal of Engineering Studies and Research* 19(1): 47–55.
- Pohokar, N. S. & Bhuyar, L. B. 2014. Estimation of Tool life and Optimization of Parameters for a CNC Parallel shank End Mill Tool Using Genetic Algorithm Approach. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 4(2): 434–442.
- Prajapati, R., Rajurkar, A. & Chaudhary, V. 2013. Tool Path Optimization of Contouring Operation and Machining Strategies for Turbo Machinery Blades. *International Journal of Engineering Trends and Technology* 4(5): 1731–1737.
- Rahman, A. K. M. A. & Feng, H.-Y. 2013. Effective corner machining via a constant feed rate looping tool path. *International Journal of Production Research*, 51(6), 1836–1851.
- Rai, J. K., Brand, D., Slama, M. & Xirouchakis, P. 2011. Optimal selection of cutting parameters in multi-tool milling operations using a genetic algorithm. *International Journal of Production Research* 49(10): 3045–3068.
- Ramaswami, H., Shaw, R. S. & Anand, S. 2010. Selection of optimal set of cutting tools for machining of polygonal pockets with islands. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 53: 963–977.
- Rodríguez, N. M., Ross, O. M., Sepúlveda, R. & Castillo, O. 2012. Tool Path Optimization for Computer Numerical Control Machines based on Parallel ACO. *Engineering Letters* 20(1): 1–4.

- Romero, P. E., Dorado, R., Diaz, F. A. & Rubio, E. M. 2013. Influence of pocket geometry and tool path strategy in pocket milling of UNS A96063 alloy. *Manufacturing Engineering Society International Conference*.1–8.
- Ross, O. M., Rodriguez, N. M., Sepulveda, R. & Melin, P. 2012. Methodology to Optimize Manufacturing Time for a CNC Using a High Performance Implementation of ACO. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9(121): 1–10.
- Saealal, M. S., Abidin, A. F., Adam, A., Mukred, J. A. A., Khalil, K., Nordin, N., Ibrahim, Z. et al. 2013. An Ant Colony System for Routing In PCB Holes Drilling Process. *International Journal of Innovative Management, Information & Production* 4(1): 50–56.
- Saroj, A. K. & Jayswal, S. C. 2013. Analysis of Different Parameters on Tool Path for Machining Sculptured Surfaces. *International Journal of Engineering Research & Technology* 2(10): 369–379.
- Sedighi, M. & Noorani Azad, M. 2008. Classification of the Feed rate Optimization Technique: A case study in Minimizing CNC Machining Time. *International Journal of Engineering Science* 19(5): 83–87.
- Selvam, M. D. 2012. Optimization of Machining Parameters for Face Milling Operation in a Vertical CNC Milling Machine using Genetic Algorithm. *Engineering Science and Technology: An International Journal* 2(4): 544–548.
- Shivakoti, I., Diyaley, S., Kibria, G. & Pradhan, B. B. 2012. Analysis of Material Removal Rate using Genetic Algorithm Approach. *International Journal of Scientific & Engineering* 3(5): 1–6.
- Shivasheshadri, M., Arunadevi, M. & Prakash, C. 2012. Simulation Approach And Optimization Of Machining Parameters In Cnc Milling Machine Using Genetic Algorithm. *International Journal of Engineering Research & Technology* 1(10): 1–10.
- Shweta, K. & Singh, A. 2013. An Effect and Analysis of Parameter on Ant Colony Optimization for Solving Travelling Salesman Problem. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing* 2(11): 222–229.
- Srinivas, P. S., Raju, V. R. & Rao, C. S. P. 2012. Optimization of Process Planning and Scheduling using ACO and PSO Algorithms. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2(10): 343–354.
- Stützle, T. & Dorigo, M. 1999. ACO Algorithms for the Travelling Salesman Problem. *Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science: Recent Advances in Genetic Algorithms, Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Programming and Industrial Applications*. 1–23. John Wiley & Sons, Inc Publication.

- Stützle, T., Manuel, L. I., Pellegrini, P., Maur, M., Oca, M. M., Birattari, M. & Dorigo, M. 2013. Parameter Adaptation in Ant Colony Optimization. *Autonomous Search*. 1–305. Springer Berlin Heidelberg.
- Tandon, V., El-Mounayri, H. & Kishawy, H. 2002. NC end milling optimization using evolutionary computation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42(5): 1–11.
- Tang, K., Chou, S.-Y. & Chen, L.-L. 1998. An algorithm for reducing tool retractions in zigzag pocket machining. *Computer-Aided Design* 30(2): 123–129.
- Thompson, M. 2005. *Development of a Five-Axis Machining Algorithm in Flat End Mill Roughing*. Brigham Young University.
- Tian, Y. & Jiang, P. 2007. Optimization of Tool Motion Trajectories for Pocket Milling Using a Chaos Ant Colony Algorithm. *IEEE International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics*. 389–394.
- Tiwari, R. K. 2013. Multi Objective Optimization of Drilling Process Variables Using Genetic Algorithm for Precision Drilling Operation. *International Journal of Engineering Research and Development* 6(12): 43–59.
- Tobergte, D. R. & Curtis, S. 2001. Degeneracy and Instability in Geometric Computation. *Geometric Modelling: Theoretical and Computational Basis Towards Advanced CAD Application*. 75: 3–16. Springer US.
- Tolouei-rad, M. & Bidhendi, I. M. 1997. On the Optimization of Machining Parameters for Milling Operations. *International Journal Mach. Tool Manufacturing Mach* 37(1): 1–16.
- Tomarere, L. Z. 2009. *Studi Perbandingan Algoritma Ant Colony System dan Algoritma Ant System pada Permasalahan Traveling Salesman Problem*. Sekolah Teknik Elektro dan Informatika Bandung.
- Wan Yaacob, W. M. Y., Haron, H. & Saad, R. M. 2006. Comparison and Optimization Using Numerical Controller Machine for Sport Rim Product: MasterCAM vs UniGraphics. *International Conference on Manufacturing Science and Technology*. 1–4.
- Wang, P., Zhang, S., Li, Z. & Li, J. 2016. Tool path planning and milling surface simulation for vehicle rear bumper mold. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(3), 1–7.
- Wang, S. G., Wang, Y. J., Wu, G. X. & Fu, Y. L. 2012. Application of Intelligence Fusion Algorithm in Path Optimization Problem. *Applied Mechanics and Materials* 151: 632–636.

- Wang, X., Zhang, H. & Wang, G. 2013. Parallel contour path planning for complicated cavity part fabrication using Voronoi-based distance map. *International SFF Symposium - An Additive Manufacturing Conference*. 749–765.
- Wang, Z. G., Wong, Y. S., Rahman, M. & Sun, J. 2005. Multi-objective optimization of high-speed milling with parallel genetic simulated annealing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 31: 209–218.
- Wei, X. 2014. Parameters Analysis for Basic Ant Colony Optimization Algorithm in TSP. *International Journal of u-and e-Service, Science and Technology* 7(4): 159–170.
- Wong T.N & Wong K.W. 1996. NC Toolpath Generation for Arbitrary Pockets with Islands. *International Journal Advance Manufacturing Technology* 12: 174–179.
- Xu, J., Sun, Y. & Wang, S. 2012. Tool path generation by offsetting curves on polyhedral surfaces based on mesh flattening. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 64(9–12): 1201–1212.
- Xu, J., Sun, Y. & Zhang, L. 2014. A Mapping-based Approach to Eliminating Self-intersection of Offset paths on Mesh Surfaces for CNC machining. *Computer-Aided Design* 62: 1–19.
- Xu, J., Sun, Y. & Zhang, X. 2012. A mapping-based spiral cutting strategy for pocket machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67(1): 2489–2500.
- Yan, S., Shuilai, W. & Shuiguang, T. 2000. Uneven offset method of NC tool path generation for free-form pocket machining. *Computers in Industry* 43(1): 97–103.
- Yazdi, M. R. S. & Khorram, A. 2010. Modeling and Optimization of Milling Process by using RSM and ANN Methods. *International Journal of Engineering and Technology* 2(5): 474–480.
- Yildiz, A. R. 2012. Cuckoo search algorithm for the selection of optimal machining parameters in milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 64: 55–61.
- Yildiz, A. R. 2013. A new hybrid differential evolution algorithm for the selection of optimal machining parameters in milling operations. *Applied Soft Computing* 13: 1561–1566.
- Yu, M. R., Zhang, Y. J. & Zhang, D. 2012. Optimization of 3D Pocket Machining Using Multiple Tools. *Advanced Materials Research* 503–504: 7–10.
- Yuanbin, M., Shuihua, X. & Jizhong, L. 2011. Particle Swarm Optimization with Complex Local Searching for Solving Optimal Moving Path for PCB. *Advances in Mathematical and Computational Methods* 1(1): 34–41.

- Yulian, E., Adesta, T., Riza, M., Suprianto, M. Y. & Hamidon, R. 2016. the Effect of Tool Path Strategies on Cutting Temperature and Cutting Force During Pocket Milling of Aisi H13. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 11(1): 337–344.
- Zhang, C. & Chen, J. 2009. Methods of optimization of milling parameters based on genetic algorithm. *International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. 382–385.
- Zhao, Z., Liu, B., Zhang, M., Zhou, H. & Yu, S. 2009. Toolpath Optimization for High Speed Milling of Pockets. *Second International Conference on Information and Computing Science*. 327–330.
- Zhu, G. Y. 2006. Drilling Path Optimization Based on Swarm Intelligent Algorithm. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* 1: 193–196.
- Zhu, S. & Zhang, W. 2008. Drilling path optimization by the particle swarm optimization algorithm with global convergence characteristics. *International Journal of Production Research* 46(8): 37–41.
- Zuperl, U. 2013. Swarm Intelligence Combined with Neural Network Objective Function Modelling for Turning Process Optimization. *Proceedings in Manufacturing Systems* 8: 1–9.

